

文章编号: 1000-5641(2010)06-0026-09

长江河口石洞口电厂扩建工程温排水 三维数值模拟

许晟轶, 朱建荣, 陈昞睿

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

摘要: 采用改进的河口海岸海洋三维数值模式 ECOM, 考虑潮汐、径流、风应力和江表面热通量的作用, 计算和分析石洞口电厂扩建工程夏季温排水的输运扩散。数值模式计算流速流向和实测资料符合良好, 表明模式能较正确地模拟长江河口的水动力过程。模式计算结果表明, 温排水分布在沿岸一带, 受径流作用, 下游受影响范围远较上游大。在本工程排水口附近, 大潮和小潮平均温升分别为 2.34 和 2.84 °C, 表层温升为 1.0 °C 的面积分别为 0.09 和 0.20 km², 底层温升为 1.0 °C 的面积均为 0.09 km²。大潮期间流速大, 平流和侧向扩散作用大, 造成大潮期间本工程排水口附近温升大小、温升沿岸扩展的范围和量值明显比小潮期间小。

关键词: 温排水; 输运扩散; 数值模拟; 长江河口

中图分类号: Q948 **文献标识码:** A

Three dimension numerical simulation of thermal discharge from the Shidongkou electric power plant expand project in the Changjiang Estuary

XU Sheng-yi, ZHU Jian-rong, CHEN Bing-rui

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University,
Shanghai 200062, China)

Abstract: By using a improved three dimension numerical ECOM (estuarine, coastal and ocean model), the transport and diffusion of thermal discharge from the Shidongkou electric power plant expansion project in summertime was calculated and analyzed, in terms of the factors of tide, river runoff, wind stress and river surface heat flux. The calculated current speed and direction is consistent with the observed data fairly well, indicating that the model can simulate the hydrodynamic processes correctly. The results show that the thermal discharge is released along with the coast, the influenced extension in the downstream is larger than that in the upstream due to the effect of river runoff. During spring and neap tides the time-averaged temperature rise near the waterspout of the project is 2.34 and 2.84 °C, respectively; the areas with surface tem-

收稿日期: 2009-12

基金项目: 河口海岸学国家重点实验室 2008 - 2009 年科研业务费科研课题 (2008KYYW07)

第一作者: 许晟轶, 男, 硕士研究生. E-mail: xsy840817@163.com.

通讯作者: 朱建荣, 男, 教授, 博导. E-mail: jrzh@sklec.ecnu.edu.cn.

perature rise $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ is 0.09 and 0.20 km^2 , respectively; and the areas with bottom temperature rise $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ are both 0.09 km^2 , respectively. The current speed is larger, the advection and lateral diffusion of water temperature is greater in spring tide, resulting in temperature rise near the waterspout of the project and its expand extent and magnitude along the coast is obvious smaller in spring tide than in neap tide.

Key words: thermal discharge; transport and diffusion; numerical simulation; Changjiang Estuary

0 引 言

在电厂发电过程中,需要冷却水提供热机冷源以冷却各种机组,冷却水的排水温度比进水温度上升 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,形成温排水,对附近水体带来热污染,同时降低发电厂机组的效率.冷却用水温度每升高 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$,机组效率要降低 1% .

国外的海洋环境学家从 20 世纪 40 年代开始就电厂温排水对附近海域的影响做过很多的调查和研究.1968 年英国学者 Harleman 等人针对 TVA Browns Ferry 核电厂进行了稳定流态和非稳定流态下电厂冷却水热扩散规律的研究^[1].McGuirk 和 Rodi 最早采用深度平均形式的 $k-\epsilon$ 紊流模型计算冷却水岸边排放近区的温度分布^[2].之后随着计算机的发展,国外学者对温排水输运扩散进行了数值计算及对环境影响作了深入研究^[3-6].

我国学者从 20 世纪 80 年代开始温排水研究,采用不同的数值模式,对众多电厂温排水作了数值计算和分析.数值模式大都采用垂向二维平均模式^[7-12],少量的采用三维模式^[13-15].因温排水一般采用表层排放,高温水浮于表层,抑制了垂向热量的交换,垂向存在水温差异,而二维模式不能体现这种差异.另外,温排水与大气的热量(感热和长波辐射)交换,是以表层绝对水温参与的,而不是垂向平均温度,更不是温升.因此,需要三维的温度输运扩散方程,真实考虑水气之间热量交换,才能更好地计算和预测温排水的输运扩散.

华能上海石洞口电厂扩建工程位于长江河口南支南岸、陈行水库下游约 6 km (见图 1).该工程的电厂循环冷却水直接取之于长江,水流引入循环水泵,由水泵升压送至主厂房冷凝汽器,经凝汽器的温排水自流入长江.该扩建工程温排水取排水量为 $40.8\text{ m}^3/\text{s}$,河水经热交换器后,排入长江的温排水温升为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$.

本文应用改进的三维河口海岸海洋数值模式 ECOM,计算分析华能上海石洞口电厂扩建工程温排水输运扩散. ECOM 模式是在 POM 模式的基础上发展起来,作者研究组在斜压压强梯度力计算上引进局域的概念,提出了扣除局域平均密度层结的思想,并且采用返回 Z 坐标系计算斜压梯度力的方法;首先采用多步逆向跟踪法确定水质点的历史位置,再用 Lagrang 插值的方法确定该点物理量的浓度值,即采用 Euler-Lagrange 方法来改进物质输运方程的平流项^[18].

1 模式设置和验证

本文采用改进的河口海岸海洋三维数值模式 ECOM,计算区域为石洞口电厂扩建工程附近南支水域,从南支崇头附近至长兴岛中段(见图 1).网格的最高分辨率为 150 m ,网格拟合岸线,具有良好的光滑性和正交性.垂向方向均匀分 5 层,计算时间步长取 10 s .上游和下

游开边界条件由大区域数值模式计算的水位提供,时间间隔为半小时.在开边界上温度由辐射边界条件给出,即流入定常,等于前一计算时步温度值,流出由前一时刻边界值和当前时刻相邻内区网格温度值加权求出,权重由网格大小和外重力波传播的速度决定.除在排水口外,法向速度为零,无热通量.在电厂的排水口,法向速度由江水冷却量计算,水温由江水环境温度加温升值给出.初始水位和流速均给为零.因温排水对环境的影响主要在夏季,故本文仅考虑本工程夏季温排水的输运扩散,参考 8 月电厂附近水域多年实测平均温度,初始水温场给为 29 °C.

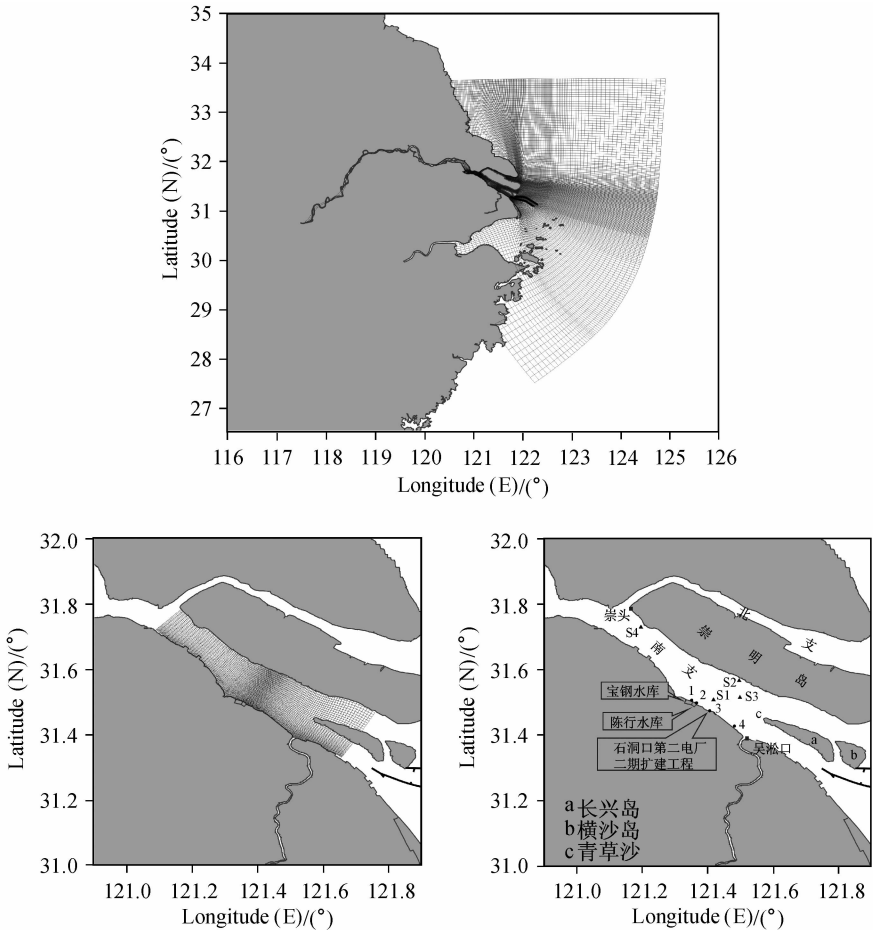


图 1 大区域模式网格(上),小区域模式网格(左下)和石洞口电厂扩建工程、观测站 S1 - S4(三角点)及模式计算输出点 1 - 4(圆点)位置(右下)

Fig. 1 Grids of the large domain model (upper), grids of the small domain model (lower left), locations of the Shidongkou electric power plant expand project, observation sites S1 - S4 and model output sites 1 - 4 (lower right)

大区域模式外海开边界潮位由 8 个主要分潮 (M_2, S_2, K_2, N_2 和 O_1, K_1, P_1, Q_1) 给出^[16],径流量和风力均取多年 8 月平均值.因此大区域模式计算结果提供给小区域温排水模式开边界资料中,包含了潮汐、径流和风力作用.

温排水除受水流的对流和湍流扩散外,还受江表面热通量的影响.江表面热通量为 $Q_0 =$

$Q_s - Q_b - Q_e - Q_h$, 其中 Q_b 江水吸收的净热量, Q_s 通过江面进入水体的太阳辐射能, Q_e 有效长波回辐射, Q_e 江水蒸发消耗的热能(潜热), Q_h 水气之间由温差引起的热量交换(感热)^[17]. 计算上述各热通量的气象资料取自吴淞气象站的实测资料.

利用 2002 年 9 月在长江河口南支的现场观测(站位见图 1), 验证数值模式. 观测资料和模式计算结果均表明, 测站表层流速大于底层流速, 落潮流速大于涨潮流速, 落潮流历时大于涨潮流历时 3~4 h. 数值模式计算结果和实测资料符合良好, 表明模式能正确地计算长江河口的水动力过程(见图 2).

温排水的运动主要受水流的平流作用, 因此给出石洞口电厂扩建工程附近水域大潮和小潮流急和落急时刻流场(见图 3). 在大潮涨、落急时, 主槽中的流速明显大于水浅处的流速, 最大流速可达到 2 m/s, 在青草沙浅滩处, 流速很小. 小潮流涨、落急时, 与大潮时相比流速明显减小, 主槽中最大流速约为 1.2 m/s 左右. 从整个流场看来, 模式精细地模拟出了长江河口南支涨潮流和落潮流, 本工程附近的流较大, 有利于温排水的输运. 由于径流、潮流共同作用下的平流作用是温排水输运的主要动因, 流场的正确模拟是计算温排水输运扩散的基础.

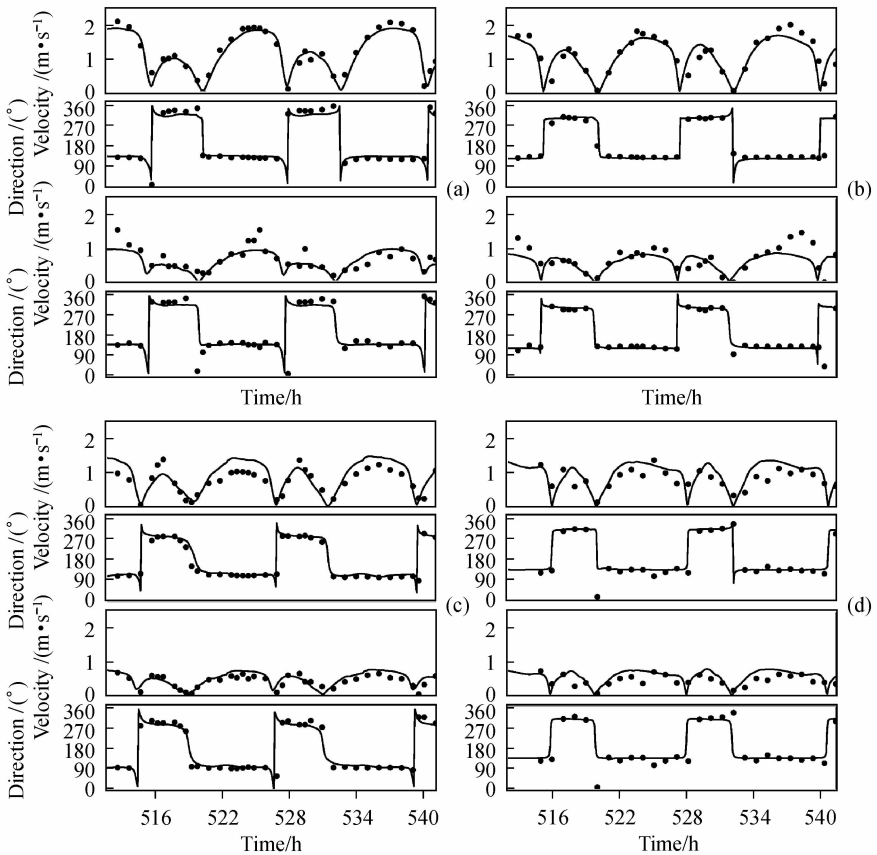


图 2 在测站 S1(a), S2(b), S3(c) 和 S4(d) 模式计算值(实线)与观测值(黑点)比较
 Fig. 2 Comparison between model calculated data (solid line) and observed ones (dots) at sites S1 (a), S2 (b), S3 (c) and S4 (d)

注: 表层流速流向位于上组, 底层流速流向位于下组

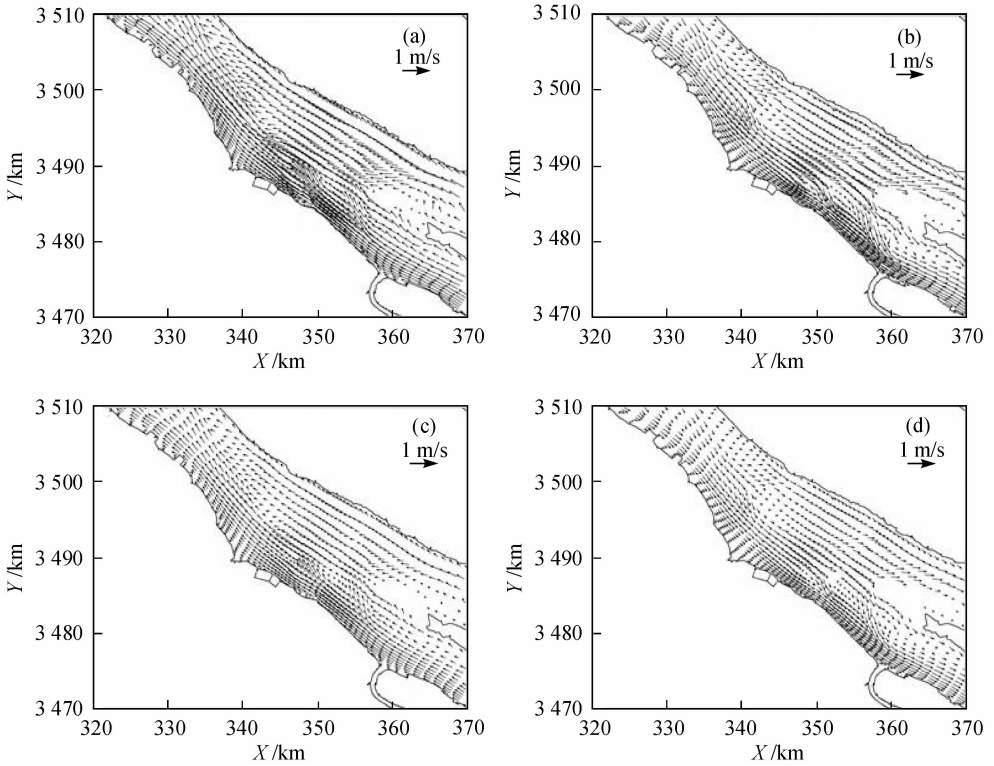


图3 本工程附近江段大潮涨急(a)、大潮落急(b)、小潮涨急(c)和小潮落急(d)时表层流场

Fig. 3 The surface maximum flood current (a), maximum ebb current (b) in spring tide and neap tide (c, d) near the expand project

2 上海石洞口电厂扩建工程温排水运输扩散

为了能清楚了解电厂温排水对江水温升的影响,模式设置了4个输出点,输出点位于本工程附近上下游沿岸水域(见图1)。半月周期的大小潮流速变化显著,典型的半日潮,潮流的日不等现象明显,大潮时最大涨潮流速可达 1.5 m/s ,小潮时约为 0.5 m/s (见图4)。从温升随时间变化看,在排水口上游的站点,涨潮时温升上升,落潮时温升明显减小,而在排水口下游的点正好相反,表明温升是由水流平流带来的。在排水口上游输出点1、2平均温升随大中小潮依次减小,变化范围不大,在 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,而在排水口下游的输出点4,平均温升随大中小潮依次增大(见表1)。在排水口附近输出点3,大中小潮平均温升分别为 $2.34, 2.60$ 和 $2.84\text{ }^{\circ}\text{C}$,小潮时流速较小,不利于温排水运输和扩散,故随着潮流的减弱本工程排水口附近温升增加,而随着温排水扩散稳定,温升的波动幅度也趋向稳定。各站点平均温升随着距离有序变化,离排水口越近,平均温升越高,排水口下游点的平均温升要高于上游点 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,原因在于径流的作用有利于温排水向下游输运。

一般对模式输出的结果,只有达到了准稳定状态才能给予分析,本工程温排水沿岸输运,15 d之后平流项和扩散项达到的平衡,这从图4中输出点1-4温升随时间变化清楚看到,温升随涨落潮变化,但变幅已趋稳定。模式的计算温排水扩展34 d,选取最后大潮和小潮时段温升数据作结果分析。一个大小潮周期15 d,根据电厂排水口计算潮位随时间变化,选

最大潮差期间 5 d 为大潮期,小潮潮差期间 5 d 为小潮期,中等潮差期间 5 d 为中潮期,对各潮型温排水作 5 d 平均,为各潮型全潮平均.从大潮全潮平均和小潮全潮平均表底层温排水水平面分布看,温排水分布在沿岸一带,温升超过 0.2 °C 的区域在本工程排水口表层附近,受径流作用,下游受影响范围远较上游大,表层温升 0.1 °C 的等值线在下游达到吴淞以下,上游仅达到陈行水库,而底层温升 0.1 °C 的等值线比表层略往下游移些(见图 5 和 6).大潮和小潮全潮表层平均温升为 0.1 °C 的面积分别为 23.25 和 32.58 km²,温升为 1.0 °C 的面积分别为 0.09 和 0.20 km²,而底层平均温升为 0.1 °C 的面积分别为 21.33 和 27.64 km²,温升为 1.0 °C 的面积均为 0.09 km²(见表 2 和 3).表层大潮期间温升的范围和量值,尤其是大潮期间温升的量值,明显比小潮期间小,原因在于大潮期间表层流速大,平流和侧向扩散作用大,而在底层则没这么明显,这与底层流速小有关.由于温排水采取表层排放,在排水口附近表层温升比底层要大许多,在其余江段则表底层温升差异不大.

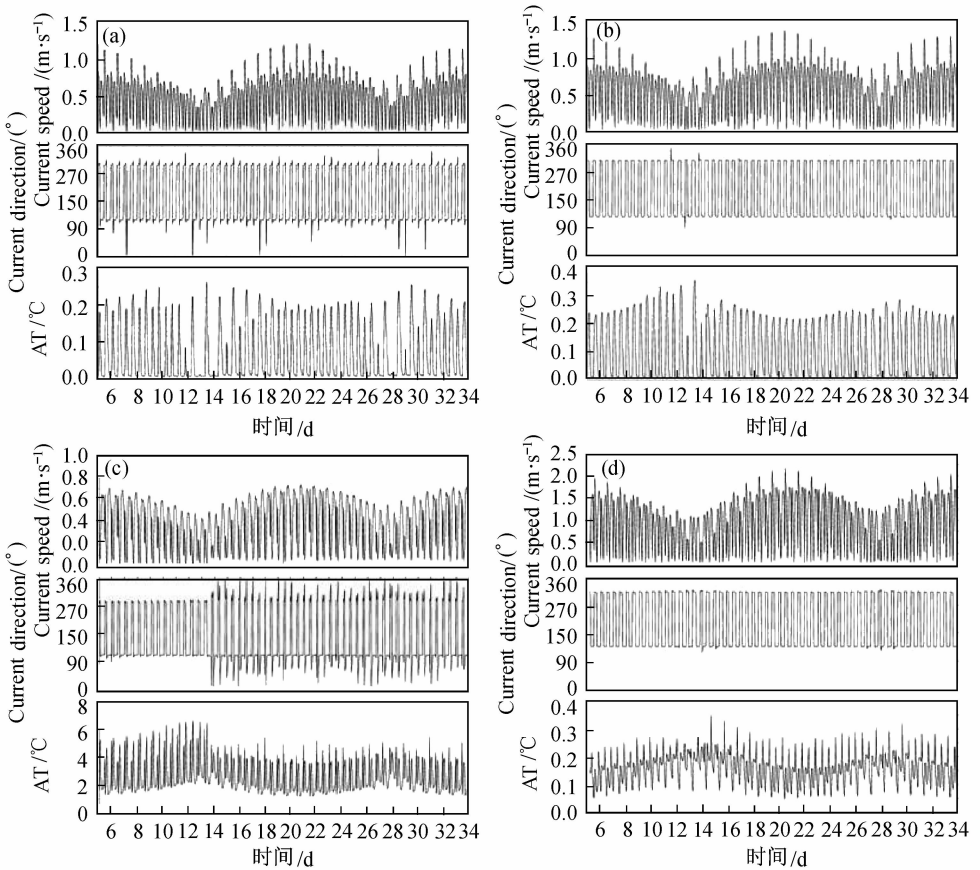


图 4 模式输出点 1(a),2(b),3(c),4(d)表层流速(上)、流向(中)和垂向平均温升(下)随时间变化

Fig. 4 Temporal variation of surface current (upper), surface direction (middle) and averaged temperature rise (lower) at model output site 1(a), 2(b), 3(c) and 4(d)

表 1 模式输出点大潮中潮小潮期间垂向平均温升最大值、最小值和平均值

Tab.1 The vertical averaged maximum, minimum and time-averaged temperature rise during spring tide, moderate tide, and neap tide

站号	大潮			中潮			小潮		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
1	0.21	0.01	0.08	0.21	0.01	0.08	0.21	0.01	0.06
2	0.23	0.01	0.11	0.25	0.01	0.11	0.26	0.01	0.10
3	5.18	1.18	2.34	4.97	1.29	2.60	5.10	1.65	2.84
4	0.27	0.05	0.13	0.28	0.06	0.14	0.30	0.06	0.16

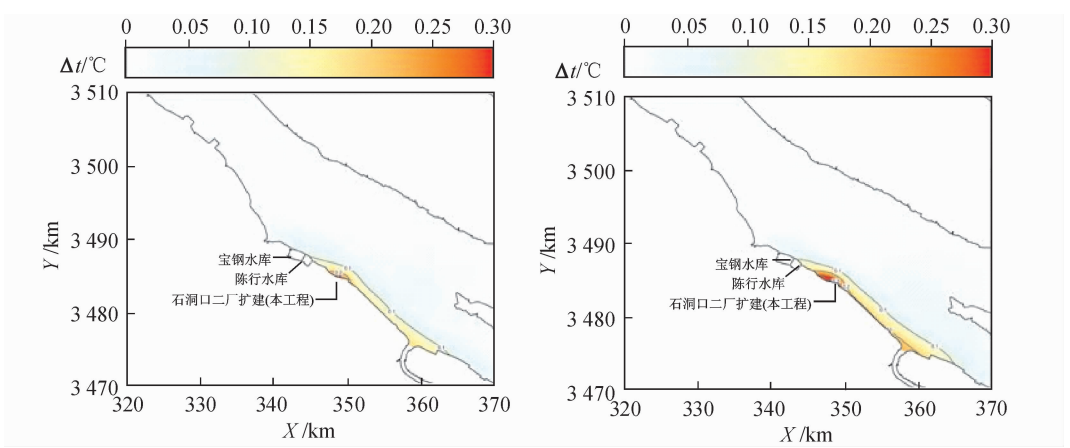


图 5 大潮(左)和小潮(右)表层全潮温升分布

Fig. 5 Spatial distributions of time-averaged surface temperature rise during spring tide (left) and neap tide (right)

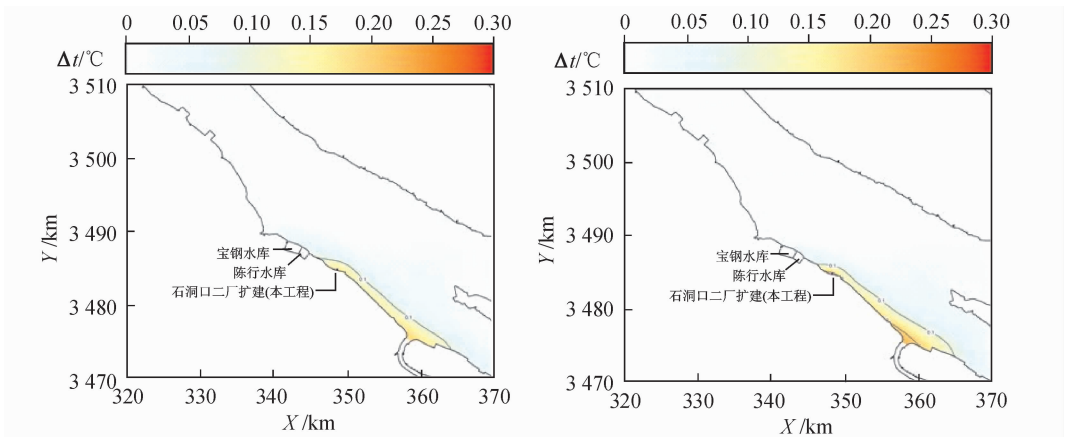


图 6 大潮(左)和小潮(右)底层全潮温升分布

Fig. 6 Spatial distributions of time-averaged bottom temperature rise during spring tide (left) and neap tide (right)

表2 本扩建工程温排水表层温升面积

Tab.2 Areas of time-averaged surface temperature rise induced by the expand project km²

时刻	温升 $\Delta t/^\circ\text{C}$					
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0
大潮全潮平均	23.25	4.73	0.99	0.55	0.20	0.09
小潮全潮平均	32.58	12.52	1.8	0.85	0.49	0.20

表3 本扩建工程温排水底层温升面积

Tab.3 Areas of time-averaged bottom temperature rise induced by the expand project km²

时刻	温升 $\Delta t/^\circ\text{C}$					
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1.0
大潮全潮平均	21.33	4.11	0.68	0.25	0.09	0.09
小潮全潮平均	27.64	10.03	0.73	0.37	0.22	0.09

5 总 结

本文采用改进的河口海岸海洋三维数值模式 ECOM, 计算石洞口电厂扩建工程夏季温排水的输运扩散. 模式计算区域为石洞口电厂扩建工程附近南支水域, 从南支崇头附近至长兴岛中段. 上游和下游开边界条件由大区域数值模式计算的水位提供, 包含了潮汐、径流和风应力的作用. 模式考虑了江表面的热通量, 包括通过江面进入水体的太阳辐射能, 有效长波回辐射, 江水蒸发消耗的热能(潜热), 水气之间由温差引起的热量交换(感热). 利用2002年9月在长江河口南支的现场观测, 验证数值模式. 数值模式计算结果和实测资料符合良好, 表明模式能正确地计算长江河口的水动力过程.

模式计算结果表明, 半月周期的大小潮流速变化显著, 潮流的日不等现象明显, 本工程附近大潮时最大涨潮流速可达 1.5 m/s, 小潮时约为 0.5 m/s. 在排水口上游的站点, 涨潮时温升上升, 落潮时温升明显减小, 而在排水口下游的点正好相反, 表明温升是由水流平流带来的. 在排水口附近, 大中小潮平均温升分别为 2.34, 2.60 和 2.84 $^\circ\text{C}$, 小潮时流速较小, 不利于温排水输运和扩散, 故随着潮流的减弱本工程排水口附近温升增加. 温排水分布在沿岸一带, 温升超过 0.2 $^\circ\text{C}$ 的区域在本工程排水口附近, 受径流作用, 下游受影响范围远较上游大, 温升 0.1 $^\circ\text{C}$ 的等值线在下游达到吴淞以下, 上游仅达到陈行水库. 大潮和小潮全潮表层平均温升为 0.1 $^\circ\text{C}$ 的面积分别为 23.25 和 32.58 km², 温升为 1.0 $^\circ\text{C}$ 的面积分别为 0.09 和 0.20 km², 而底层平均温升为 0.1 $^\circ\text{C}$ 的面积分别为 21.33 和 27.64 km², 温升为 1.0 $^\circ\text{C}$ 的面积均为 0.09 km². 由于温排水采取表层排放, 在排水口附近表层温升比底层要大许多, 在其余江段则表底层温升差异不大. 大潮期间温升的范围和量值, 尤其是大潮期间温升的量值, 明显比小潮期间小, 表层比底层突出, 原因在于大潮期间比小潮期间流速大, 表层流速比底层流速大, 平流和侧向扩散作用大.

[参 考 文 献]

- [1] HARLEMAN D R F, HALL L C. Thermal diffusion of condenser water in a river during steady and unsteady flows with application to the T V A. Browns Ferry nuclear power plant [J]. Hydrodynamics Laboratory Report, 1968 (3): 98-115.

- [2] MCGUIRK J J, RODI W. A depth averaged mathematical model for near field of side Discharges into open channel flow [J]. *Fluid Mech*, 1978(86): 761-781.
- [3] HAMRICK J V. Analysis of water temperatures in Conowingo pond as influenced by the Peach Bottom atomic power plant thermal discharge [J]. *Environmental Science & Policy*, 2000, 3(suppl): 197-209.
- [4] FLORENTINA M, JOEL G. Water temperature behavior in the River Loire since 1976 and 1881 [J]. *C R Geoscience*, 2006, 338 (5): 319-328.
- [5] WEBB B W, NOBILIS F. Water temperature behavior in the River Danube during the twentieth century[J]. *Hydrobiologia*, 1994, 291: 105-113.
- [6] POORNIMA E H, RAJADURAI M, RAO T S, et al. Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton [J]. *Water Research*, 2001, 1(35): 271-283.
- [7] 张继民. 电厂温排水对水生生物的热影响及水质影响研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
ZHANG J M. Study on the thermal effect on hydrobiont and water quality for thermal discharge[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [8] 王银爽. 电厂温排水数值模拟[D]. 南京: 河海大学, 2007.
WANG Y S. Numerical Simulation of Thermal Discharge from Power Plant[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [9] 吴海杰, 王志刚, 陈淑丰. 滨海电站温排水数值模[J]. *电力环境保护*, 2005, 21(4): 48-51.
WU H J, WANG Z G, CHEN S F. Numerical simulation of cooling water dispersion for coastal power station[J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2005, 21(4): 48-51.
- [10] 杨芳丽, 谢作涛, 张小峰, 等. 非正交曲线坐标系平面二维电厂温排水模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2005(2): 36-40.
YANG F L, XIE Z T, ZHANG X F, et al. Simulation of 2-D cooling water in non-orthogonal curvilinear coordinate[J]. *Hydro-science And Enguneering*, 2005(2): 36-40.
- [11] 崔丹, 姜治兵. 近岸海域电厂温排水数值模拟[J]. *长江科学院院报*, 2008, 25(2): 13-15.
CUI D, JIANG Z B. Numerical simulation of thermal discharge in coastal area[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2008, 25(2): 13-15.
- [12] 朱羿. 电厂温排放的水环境数学模拟及热环境容量计算[D]. 南京: 河海大学, 2005.
ZHU Y. Numerical Simulation and Calculation of Heat Environmental Capacity about Heated Discharge from Power Plant[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [13] 何国建, 赵慧明, 方红卫. 潮汐影响下电厂温排水运动的三维数值模拟[J]. *水力发电学报*, 2008, 27(3): 125-136.
HE G J, ZHAO H M, FANG H W. 3D numerical simulation for flow and heat transport of power plant affected by tide[J]. *Journal Of Hydroelectric Engineering*, 2008, 27(3): 125-136.
- [14] 朱军政. 强海湾温排水三维数值模拟[J]. *水力发电学报*, 2007, 26(4): 56-60.
ZHU J Z. Numerical simulation of 3-D cooling water in the huge tidal bay[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(4): 56-60.
- [15] 周莉华. 基于 POM 模型的天生港电厂温排水三维数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
ZHOU L H. Numerical Simulation and Calculation of the Heated discharge from Tiansheng Port Power Plant based on POM model[D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [16] 朱建荣, 张衡, 吴辉. 东海黄海渤海 8 个主要分潮的数值模拟[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2005(3): 71-77.
ZHU J R, ZHANG H, WU H. Numerical simulation of eight main tidal constituents in the East China Sea, Yellow Sea and Bohai Sea[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2005(3): 71-77.
- [17] 冯士筴, 李凤岐, 李少菁, 等. *海洋科学导论*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
FENG S Z, LI F Q, LI S J, et al. *An Introduction to Marine Science* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [18] 朱建荣. *海洋数值计算方法和数值模式*[M]. 北京: 海洋出版社, 2003.
ZHU J R. *Ocean Numerical Calculation Methods and Numerical Model* [M]. Beijing: China Ocean Press, 2003.